Андрущак С.В., аспирант,
Беседин П.В., д-р техн. наук, проф.,
Алексеев С.В., канд. техн. наук, доц.
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

РАЗРАБОТКА ЭКСТРЕМАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОДАЧЕЙ ШЛАМА В ЦЕМЕНТНУЮ ПЕЧЬ

sg-bel@mail.ru

Рассмотренная методика экстремального управления подвижностью шлама при механическом воздействии позволяет эффективно снизить энергозатраты на получение клинкера за счет уменьшения количества воды, используемой для разжижения шлама на 5…9 % при воздействии вибрирующего органа в диапазоне частот от 10 до 35 Гц. При этом снижается расход тепла на испарение влаги в печном агрегате, а также уменьшается количество электроэнергии, потребляемой насосами при перекачивании шлама. Особенно важно то, что значительно увеличивается подвижность шламов, приготовленных на основе сырьевых материалов с высокой гигроскопичностью. Рассмотренную методику управления подвижностью можно применить не только для шлама, но и для других неньютоновских бингамовских жидкостей, таких как очень густые суспензии и пасты.

Ключевые слова: *экстремальное управление, цементный шлам, реологические свойства шлама, математическая модель, механические воздействие.*

Введение. В цементной технологии мокрого способа производства цемента около 40 % топлива, расходуемого на обжиг клинкера, затрачивается на испарение воды, которая обеспечивает подвижность шлама [1]. Известно также, что снижение влажности шлама на 1% приводит к экономии топлива, расходуемого на обжиг клинкера, на 5 % [2, 3, 4], при этом снижение влажности шлама приводит к увеличению производительности печей.

На подвижность шламов оказывает заметное влияние воздействие вибрирующих органов [5, 6]. Особенно важно то, что вибрирующее воздействие значительно увеличивает подвижность шламов с высокой гигроскопичностью. Например, шлам с растекаемостью 52 мм в результате вибровоздействия увеличил свою подвижность более чем в 11 раз.

В результате экспериментальных исследований было установлено, что виброобработка позволяет снизить влажность транспортируемых шламов на 5…9 % при воздействии в диапазоне частот от 10 до 35 Гц, т.е. данная зависимость вязкости шлама имеет экстремальный характер [7]. При этом заранее неизвестно точное оптимальное значение частоты, так как цементные заводы имеют сырьевые материалы различной минералогической природы, а также это значение может «смещаться» на каждом конкретном заводе из-за изменений реологических свойств шламов. Для решения поставленной задачи был разработан способ регулирования подачи шлама в цементную печь [8], а также методология нечеткого вывода в задаче управления дозированием шлама [9, 10].

Однако, учитывая особенности реологических свойств перекачиваемого шлама, в частности, его вязкость и подвижность, имеющих экстремальный характер изменения этих свойств, при воздействии вибрирующих органов, то для реализации процесса управления подвижностью шлама стало целесообразным применить систему управления, из класса адаптивных самонастраивающихся (экстремальных) систем автоматического управления.

Целью исследования является разработка математической модели для реализации экстремальной системы управления подвижностью шлама при механическом воздействии на него вибрирующего органа, где поиск экстремума реализован по методу измерения производной с помощью шагового алгоритма.

Методология

Структура объекта управления и его математическая модель

Задача оптимального управления подвижностью шлама состоит в определении закона $\omega(t)$ изменения во времени частоты вибрации, при котором перепад давления в вибрирующем патрубке, через который протекает шлам, имеет максимальное значение (рис. 1). При максимальном перепаде давления достигается наилучшая подвижность шлама для его перекачивания с помощью шламового насоса, а также существуют значения частоты вибрации, при которых достигается максимальное значение перепада давления в условиях дрейфа, вызванного изменением влажности шлама $w(t)$.

В общем случае уравнение безынерционного экстремального объекта регулирования имеет вид:

$$\eta = f(\omega_1,...,\omega_m, w_1,...,w_n). \quad (1)$$

Функция f обладает тем свойством, что для каждого фиксированного набора чисел $w_1,...,w_n \in \Omega_w$ существует набор $\omega_1^*,...,\omega_m^*$, при котором f достигает минимума или максимума. Это означает в случае максимума, что

$$f(\omega_1^*,...,\omega_m^*, w_1,...,w_n) \geq f(\omega_1,...,\omega_m, w_1,...,w_n). \quad (2)$$

Далее стоит отметить, что для любого набора $w_1,...,w_n$ набор $\omega_1^*,...,\omega_m^*$ единственный (функция f имеет только одну точку экстремума-минимума).

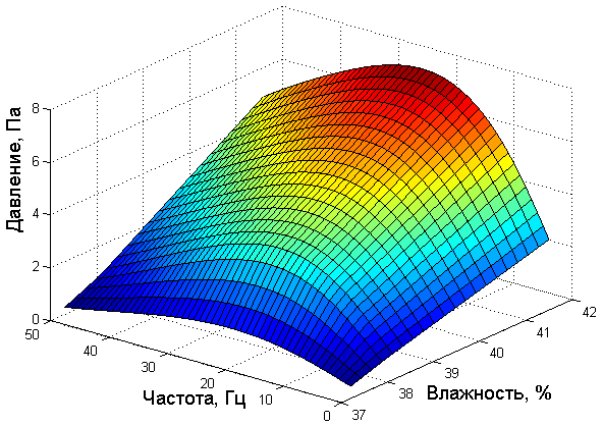

Рис. 1 Экстремальная зависимость перепада давления от частоты вибрации и влажности сырьевого шлама

Безынерционность объекта позволяет упростить структуру адаптивного регулятора, что математически означает: $\omega_k(t)=\beta_k$ $(k=\overline{1,m})$. Другими словами, управляющее воздействие формируется как настраиваемые параметры (из условия $max\, f$), т.е. управляющими параметрами.

Таким образом, уравнение экстремального объекта принимает вид

$$\eta = f(\beta_1,...,\beta_m, w_1,...,w_n), \quad (3)$$

где $\beta_i(t)$ $(i=\overline{1,m})$ - управляющие настраиваемые параметры.

Подвижность шлама, как объект экстремального управления является однопараметрическим, т.е. имеет один управляющий (оптимизирующий) параметр – частоту вибрации вибратора.

Уравнение однопараметрического объекта имеет вид:

$$\eta = f(\beta, w). \quad (4)$$

В структуру математической модели объекта управления (рис. 2), созданной в среде Simulink, для исследования динамики экстремального управления подвижностью шлама входят следующие компоненты: электродвигатель (Engine), вибратор (Vibrator), датчик (Sensor) и экстремальная характеристика объекта (Extreme), входными сигналами для которой являются частота вибрации (frequency) и влажность шлама (humidity), а выходным – перепад давления на участке трубопровода с вибратором.

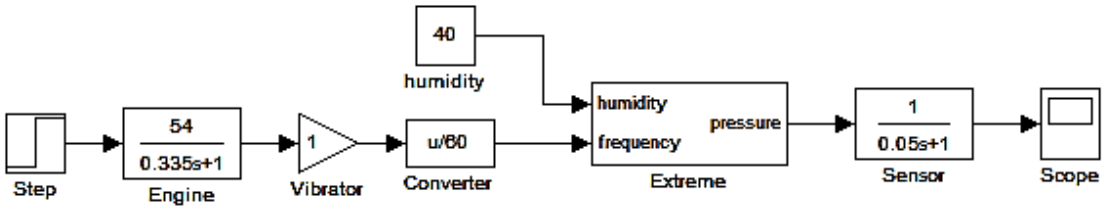

Рис. 2 Структурная модель объекта управления виброобработкой шлама в среде Matlab Simulink

Учитывая дополнительную информацию об объекте управления, полученную в ходе экспериментальных исследований, далее будем полагать, что объект одноэкстремальный, а характеристика f – непрерывная и непрерывно-дифференцируемая функция своих аргументов. Инерционностью экстремального объекта можно пренебречь, поскольку главной задачей в системе экстремального регулирования является отслеживание дрейфа экстремума статической характеристики объекта, поэтому рассматриваемую систему можно отнести к классу статических самонастраивающихся систем.

Существуют следующие методы поиска экстремума в однопараметрических экстремальных системах:

- измерение производной;
- запоминание экстремума;
- периодический поисковый сигнал.

Алгоритм поиска экстремума по методу измерения производной

Рассмотрим поиски экстремума по методу измерения производной с помощью шагового алгоритма, так как его реализация с помощью современных дискретных вычислительных средств наиболее удобно реализуема [11].

Запишем приближенное выражение производной:

$$\frac{\partial f}{\partial \beta} \approx \frac{f(\beta+\Delta\beta, w) - f(\beta-\Delta\beta, w)}{2\Delta\beta}, \qquad (5)$$

где $\Delta\beta$ – достаточно малое число пробного шага.

При $\Delta\beta \to 0$ выражение в правой части совпадает с производной f.

Значения $f(\beta+\Delta\beta, w)$ и $f(\beta-\Delta\beta, w)$ доступны непосредственному измерению, поэтому приближенное значение производной f может быть получено при вычитании измерений для двух значений управляющего параметра (различающихся на величину $2\Delta\beta$) и делении разности на число $2\Delta\beta$. Так как воздействия на объект управления пробными шагами требует времени T, то алгоритм поиска экстремума можно описать дискретно в виде:

$$\beta[(k+1)T] = \beta(kT) - a_k / 2\Delta\beta[f(\beta(kT)+\Delta\beta, w) - f(\beta(kT)-\Delta\beta, w)] \quad (k = 0,1,2,...). \qquad (6)$$

Представим параметр $b_k = a_k/2\Delta\beta$ $(k=1, 2, 3, ...)$, который назовем параметром рабочего шага.

Таким образом, поисковый алгоритм экстремального управления состоит из следующих действий:

1. в момент времени $t_0=0$ к объекту прикладывается пробное воздействие $\beta_0+\Delta\beta$, $\beta_0-\Delta\beta$ и определяются значения выхода объекта;
2. на основе выражения 6 формируется первый рабочий шаг $\beta(T)= \beta_0-b_1[f(\beta_0+\Delta\beta, w) - f(\beta_0-\Delta\beta, w)]$;
3. к объекту прикладывается управляющее воздействие $\beta(T)$;
4. на второй итерации к объекту вновь прикладываются пробные воздействия $\beta(T)+\Delta\beta$ и $\beta(T)-\Delta\beta$ и измеряется выход объекта;
5. вычисляется значение управляющего параметра на втором шаге $\beta(2T)=\beta(T)-b_2[f(\beta(T)+\Delta\beta, w) - f(\beta(T)-\Delta\beta, w)]$;
6. к объекту прикладывается управляющее воздействие $\beta(2T)$.

Продолжая итерационный процесс, получаем движение состояния системы управления подвижностью шлама к экстремальному значению.

Далее рассмотрим метод выбора рабочего шага, так как алгоритм адаптации (6) содержит этот неопределённый параметр $b_k = a_k/2\Delta\beta$ $(k=1, 2, ...)$. Данный параметр имеет неоднозначные требования, предъявляемые к его величине. Для повышения скорости поиска экстремального значения β^* значения b_k целесообразно выбирать большими. Однако при этом «проскочить» экстремум на значительную величину, и на следующей итерации так же произойдет «проскок» экстремума и в системе возникнут колебания большой амплитуды. Для решения данного противоречия необходимо выбирать большие значения b_k в начале поиска экстремума, и уменьшать эти значения при приближении к экстремуму. Так как значение β^* заранее неизвестно, то выбор значений b_k $(k=1, 2, ...)$ можно выполнять адаптивно. Для этого достаточно увеличивать b_k при совпадении знаков двух последовательных шагов поиска и уменьшать в противном случае.

В качестве алгоритма адаптации величины рабочего шага можно принять алгоритм

$$b_{k+1} = b_k(1 + \nu \cdot sign\ \Delta_p\beta(kT)\ \Delta_p\beta[(k-1)T]), \qquad (7)$$

где $\Delta_p\beta(kT)$, $\Delta_p\beta[(k-1)T]$ – значения k-го и $(k-1)$-го рабочих шагов алгоритма (6) экстремального управления; ν – некоторое положительное число, выбирая из условия устойчивости процесса (7).

При сходимости решения к числу β^* предположим, что пробный шаг $\Delta\beta$ достаточно мал:

$$\left.\frac{\partial f}{\partial \beta}\right|_k = r(\beta(kT),\ w) = r_k. \qquad (8)$$

Тогда величина r_k вычисляется достаточно точно. Следовательно, (7) примет вид:

$$\beta[(k+1)T] = \beta(kT) - a_k r_k \quad (k = 0,1,2,...). \qquad (9)$$

Наложим на функцию $r(\beta, w)$ ограничения, чтобы эта функция удовлетворяла неравенству:

$$|r(\beta, w)| < s|\beta - \beta^*|, \qquad (10)$$

где s - неизвестное положительное число.

Определим эффективность k-го шага следующим числом:

$$\nu_k = \frac{\beta[(k+1)T] - \beta^*}{\beta(kT) - \beta^*} \quad (k = 0,1,2,...), \qquad (11)$$

модуль которого характеризует скорость приближения к экстремуму при k-м рабочем шаге. Если $|\nu_k|>1$, то происходит удаление от точки β^*, а если $|\nu_k|<1$, то приближение к экстремуму. Подставляя данное условие в (9) получим:

$$v_k = \frac{\beta(kT) - \beta^* - a_k r_k}{\beta(kT) - \beta^*} = 1 - a_k \frac{r_k}{\beta(kT) - \beta^*} \quad (k = 0,1,2,...). \tag{12}$$

Из полученного выражения можно получить условие сходимости:

$$|v_k| = \left| 1 - a_k \frac{r_k}{\beta(kT) - \beta^*} \right| < 1$$

или

$$0 < a_k \frac{r_k}{\beta(kT) - \beta^*} < 2. \tag{13}$$

Так как дробь в выражении (13) всегда больше 0, то можно не рассматривать левую часть меньше 0 в двойном неравенстве.

На основе (10) получим условие сходимости поиска экстремума:

$$a_k s < 2 \quad (k = 0,1,2,...). \tag{14}$$

Задавая величину s согласно условию, можно обеспечить устойчивость процесса поиска экстремума:

$$a_k \le \frac{1}{s} \quad (k = 0,1,2,...). \tag{15}$$

Из уравнений (49) и (50) получим выражения для расчета параметра s:

$$s \approx \frac{r(\beta, w)}{|\beta - \beta^*|} = \frac{f(\beta + \Delta\beta, w) - f(\beta - \Delta\beta, w)}{2\Delta\beta|\beta - \beta^*|}. \tag{16}$$

Основная часть

Разработка экстремального регулятора в среде Matlab Simulink

Рассмотрим реализацию описанного алгоритма экстремального управления в современном средстве имитационного моделирования Matlab Simulink, которое позволяет значительно упростить анализ динамики сложных экстремальных систем при различных алгоритмах работы экстремальных регуляторов [12]. В структуре модели системы экстремального управления (рис. 3) лежит модель объекта управления, созданная в среде Simulink, для исследования динамики экстремального управления подвижностью шлама [13].

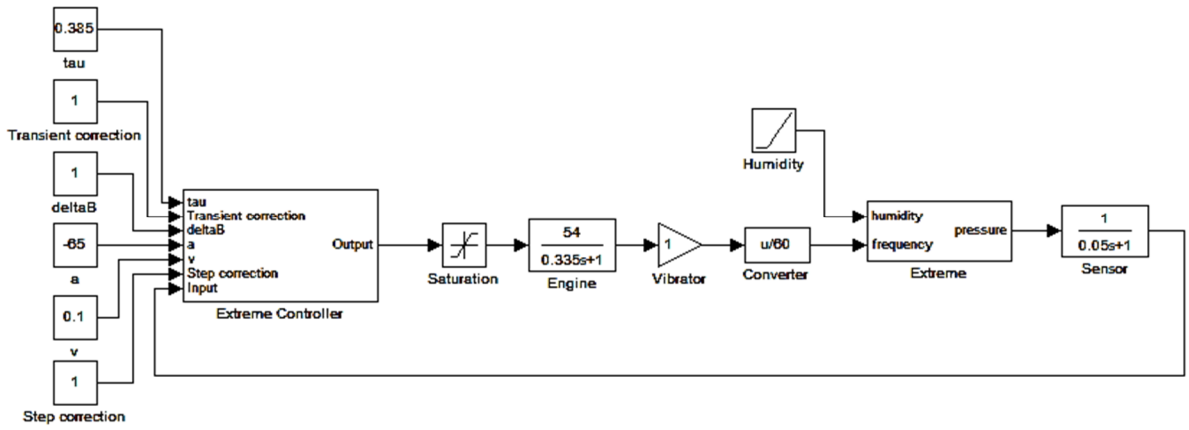

Рис. 3 Структурная модель системы экстремального управления в среде Matlab Simulink

Алгоритм управления заложен в блоке (Extreme Controller), который имеет один выходной параметр – частота вибрации, и семь входных параметров: Input – перепад давления на участке вибрации, является обратной связью; tau – постоянная времени объекта управления, включая привод вибратора и датчики; deltaB – значение пробного шага (5); a – величина рабочего шага (6); v – коэффициент устойчивости адаптации рабочего шага (7); Transient correction – включение отслеживания переходного процесса; Step correction – включение адаптации рабочего шага.

Экстремальный регулятор (Extreme Controller) воздействует через исполнительный механизм на объект управления. Объект управления представлен в виде нелинейной экстремальной статической характеристики (Extreme), представленной на рисунке 1, которая при дрейфе является также функцией времени. Инерционные свойства объекта и измерительных устройств отражает динамическая часть в виде вибратора (Vibrator) с двигателем (Engine) и дифференциального манометра (Sensor). Дрейф влажности шлама задается блоком (Humidity) и монотонно изменяется на протяжении всего времени моделирования.

Далее рассчитаем входные параметры экстремального регулятора. Согласно выражению (5) число пробного шага $\Delta\beta$ (deltaB) должно быть минимально, однако, реальный электропривод на базе частотного преобразо-

вателя сможет достаточно точно изменять обороты двигателя с шагом $2\Delta\beta = 120$ *об/мин*, т.е. $\Delta\beta = 1$ *Гц*.

Постоянную времени объекта управления (tau) для рассматриваемой модели можно определить аналитически из общей передаточной функции динамических звеньев:

$$W(s) = W_Д(s) \cdot W_B(s) \cdot W_M(s) = \frac{54}{0{,}01675s^2 + 0{,}385s + 1}, \quad (17)$$

где $\tau_2=0{,}0165$ *с*, $\tau_1=0{,}385$ *с*.

Для объектов управления, у которых не стоит задача получения их модели, постоянную времени можно определить экспериментально, проанализировав переходный процесс при ступенчатом входном сигнале.

Далее рассчитаем величину рабочего шага согласно условию устойчивости процесса поиска экстремума (15). Для этого примем $\beta=2$ *Гц*, $\Delta\beta=1$ *Гц*, влажность сырьевой смеси $\omega=40\%$, а также прогнозируемое значение рабочего шага в точке экстремума $\beta^*=23$.

Определим значения выхода объектов, проведя моделирование:

$$f(\beta - \Delta\beta, w) = 1{,}669 \ \text{Па}; \quad f(\beta + \Delta\beta, w) = 2{,}298 \ \text{Па}.$$

По формуле (16) рассчитаем значение s:

$$s = \frac{2{,}298 - 1{,}669}{2 \cdot 1 \cdot |2 - 23|} = 0{,}015; \quad \frac{1}{s} = 66{,}77.$$

В итоге, согласно выражению (15) установим величину рабочего шага a_k равной 65.

По условию $|v_k|<1$ примем коэффициент устойчивости адаптации рабочего шага v равным 0,1.

Представим алгоритм экстремального управления в виде структурной модели регулятора (рис. 4), разработанного в среде Simulink, и построенного в соответствии в рассмотренными алгоритмами управления [14].

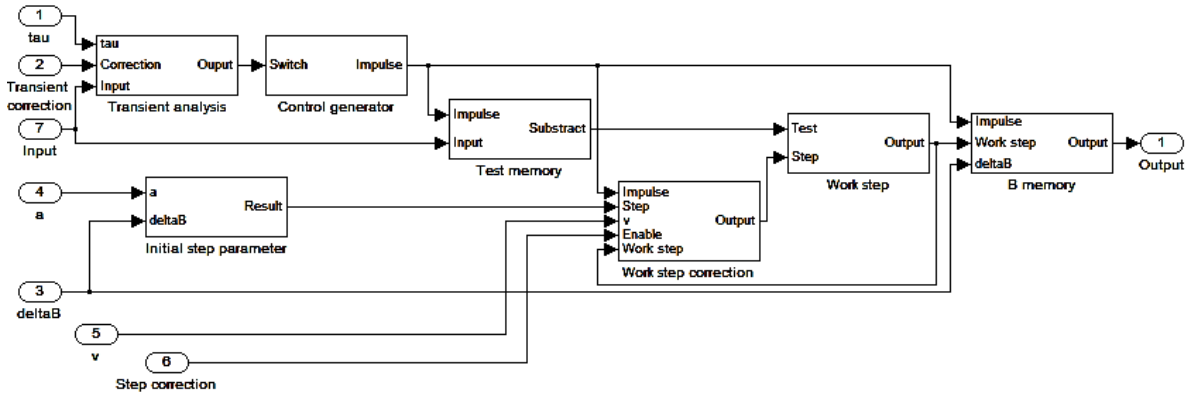

Рис. 4 Структурная схема экстремального регулятора в среде Matlab Simulink

Входной сигнал перепада давления, а также значение tau, поступают в блок анализа переходного процесса (Transient analysis). Данный блок выдает импульсные сигналы в моменты времени, когда переходный процесс пробного воздействия завершился, или через равные промежутки времени 4 × tau, если отключено отслеживание переходного процесса (Transient correction).

Согласно алгоритму поиска экстремума (6) к объекту управления должны прикладываться пробные воздействия $\beta_k+\Delta\beta$, $\beta_k-\Delta\beta$. Синхронизацию между всеми блоками регулятора для переключения между пробными воздействиями осуществляет блок (Control generator), ключевым компонентом которого является RS-триггер. Сигналом к переключению триггера является импульс, поступающий от блока (Transient analysis).

Следующий блок (Test memory) хранит в своей памяти значения выхода объекта для пробных воздействий $\beta_k+\Delta\beta$, $\beta_k-\Delta\beta$. Сигналом к сохранению результата положительного $\beta_k+\Delta\beta$ воздействия является спад импульсного входного сигнала, а к сохранению отрицательного $\beta_k-\Delta\beta$ фронт импульсного сигнала. Выходным значением данного блока является разность между значениями выхода объекта для пробных воздействий $\beta_k+\Delta\beta$ и $\beta_k-\Delta\beta$ одной итерации алгоритма.

В блоке (Initial step parameter) осуществляется расчет начального параметра рабочего шага $b_0= a_0/2\Delta\beta$, который поступает на вход блока (Work step correction). Алгоритм адаптации параметра рабочего шага (7) заложен в блоке (Work step correction). Блок (Work step) согласно выражению (6) выполняет произведение параметра рабочего на разность значений выхода для

пробных воздействий $\beta_k+\Delta\beta$ и $\beta_k-\Delta\beta$. Вычисленный сигнал поступает на выход блока. Для хранения в памяти и подачи на выход экстремального регулятора пробных воздействий $\beta_k+\Delta\beta$ и $\beta_k-\Delta\beta$ используется блок (B memory).

Переключение между пробными воздействиями осуществляется подачей на вход блока импульсов от блока (Control generator). При поступлении фронта импульса, происходит переключение от отрицательного пробного воздействия $\beta_k-\Delta\beta$ к положительному $\beta_k+\Delta\beta$. Когда на вход поступает спад импульсного сигнала, выполняется расчет k+1 рабочего шага согласно выражению (6), и сохраняется в блоке (Memory B). Для этого вычисляется разность текущего рабочего шага β_k и рассчитанного в блоке (Work step) значения корректировки. Также при спаде импульсного сигнала осуществляется переключение к отрицательному воздействию $\beta_k-\Delta\beta$.

Анализ графиков переходных процессов при движении системы к экстремуму

Результаты исследования динамики функционирования экстремального регулятора представлены в виде графиков переходных процессов в двух режимах поиска: с отслеживанием завершения переходного процесса и адаптацией рабочего шага (рис. 6), и без них (рис. 5).

По полученным кривым графически определим параметры качества работы экстремальной системы, а именно частоту и амплитуду автоколебаний, а также величину потерь на поиск экстремума [15].

Анализируя полученные графики можно проследить, что включение параметров коррекции поиска (Transient correction) и (Step correction) улучшают качество работы экстремальной системы, повышаяя ее быстродействие и снижая потери на поиск, за счет уменьшения времени выхода на экстремум после смещения характеристики объекта.

После выхода системы на экстремальное значение 24 Гц ее движение характеризуется наличием поисковых колебаний ("рысканий") около экстремума с амплитудой автоколебаний 1 Гц и частотой около 3 $с^{-1}$. При отключенной коррекции выход системы на экстремальное значение в 7 Па произошел приблизительно за 7 секунд модельного времени, а с коррекцией за 4 секунды, следовательно потери на поиск составляют 7 и 4 секунды соответственно.

На графике смоделированного переходного процесса можно проследить заданный дрейф влажности от 41% до 40,3% в результате чего перепад давления на патрубке с вибратором упал от 7 до 6 Па. При этом также происходит смещение искомой экстремальной частоты в меньшую сторону.

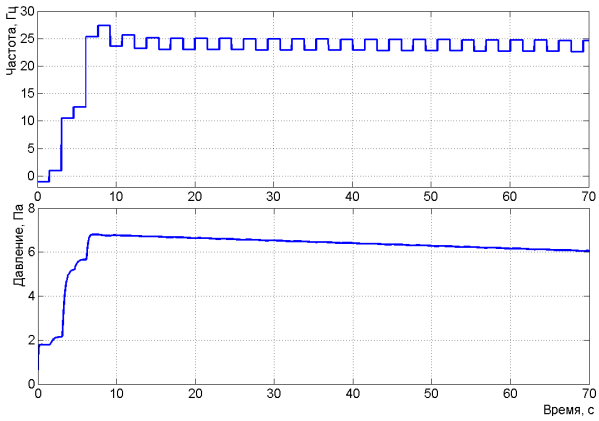

Рис. 5 График переходного процесса движения системы к экстремуму без отслеживания завершения переходного процесса и адаптации рабочего шага в среде Matlab Simulink

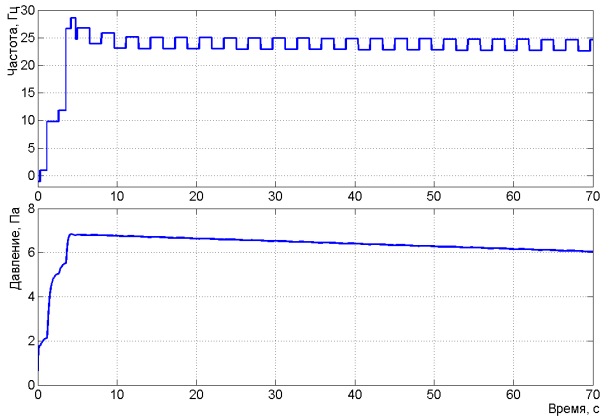

Рис. 6 График переходного процесса движения системы к экстремуму с отслеживанием завершения переходного процесса и адаптацией рабочего шага в среде Matlab Simulink

Выводы

1. Механическое воздействие вибрирующего органа с частотой вибрации 10 - 35 Гц позволяет увеличить подвижность цементного шлама, а за счет увеличения его подвижности - снизить влажность шлама на 5 - 9 %. При этом, предложенная в работе математическая модель экстремальной системы управления подвижностью шлама, позволяет обеспечить оптимальную частоту вибрации вибрирующего органа, которая в свою очередь обеспечивает максимальную подвижность шлама.

2. Особенно важно отметить то, что предложенный метод воздействия частоты вибрации на шлам, значительно увеличивается подвижность шламов, приготовленных на основе сырьевых материалов с высокой водопотребностью. Предложенный метод регулирования подвижности шлама может быть использован не только для цементных шламов, но и для других вязко-пластичных суспензий,

например, неньютоновских и бингамовских жидкостей.

3. Разработанный алгоритм реализован в среде имитационного моделирования Matlab Simulink, логика программирования в которой схожа с написанием программ для программируемых логических контроллеров.

4. Реализованный алгоритм управления может быть портирован в любой современный ПЛК. Включение коррекции поиска в алгоритме регулятора улучшают качество работы экстремальной системы, повышаяя ее быстродействие и снижая потери на поиск экстремума за счет уменьшения времени выхода на экстремум после смещения характеристики объекта.

5. Для внедрения рассмотренной системы потребуется незначительная реконструкция оборудования, используемого в технологии перекачки шламов, без значительных капитальных затрат на модернизацию.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Беседин П.В., Трубаев П.А., Панова О.А., Гришко Б.М. Некоторые направления энергосбережения в технологии цемента // Цемент и его применение. 2011. № 2. С. 130–134.

2. Беседин П.В., Андрущак С.В., Козлов В.К. Методы физико-механического регулирования реологических свойств сырьевых шламов // Цемент и его применение. 2015. № 3. С. 70–73.

3. Пономарев И.Ф. Эффективные способы снижения влажности сырьевого шлама // Цемент. 1974. № 2. С. 9–11.

4. Богомолов Б.Н. Интенсификация процесса обжига путем предварительной виброобработки сырьевых шламов // Цемент. 1973. №7.С. 9–11.

5. Беседин П.В., Андрущак С.В., Козлов В.К. Исследование и моделирование процесса движения цементного шлама в лабораторных условиях // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2015. №4. С. 113–119.

6. Ткачев, В. В. Снижение влажности шлама путем разрушения его коагуляционной структуры. // Цемент. 1974. № 5. С. 12–13.

7. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии // 8-ое изд. - М.: Химиздат, 1971. 783 с.

8. Пат. 2014112882. Российская Федерация, МПК F 27 B 7/32. Способ регулирования подачи шлама в цементную печь / Беседин П.В., Андрущак С.В., Шарапов Р.Р., Козлов В.К., Новичков С.Г.; заявитель и патентообладатель Белгородский государственный университет; заявл. 02.04.2014; опубл. 2015.06.30.

9. Беседин П.В., Андрущак С.В., Козлов В.К. Методы нечеткой логики в задачах управления дозированием шлама // Цемент и его применение. 2014. № 6. С. 74–77.

10.Besedin P.V., Andrushhak S.V., Kozlov V.K. Fuzzy Inference Technique in the Task of Sludge Batching Management // International Journal of Soft Computing. 2015. Vol.10–13.

11.Александров А.Г. Оптимальные и адаптивные системы: Учеб. пособие для вузов по спец. «Автоматика и упр. в техн. системах». М.: Высш. шк, 1989. 263 с.

12.Рубанов В.Г., Бушуев Д.А. Моделирование экстремальных систем управления в среде matlab и simulink как средство анализа динамики. // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: История. Политология. Экономика. Информатика. 2012. № 19–1 (138). . 169–175.

13.Кривилев А. Основы компьютерной математики с использованием системы MATLAB. М: Лекс-Книга, 2005. 492 с.

14.Черных, И.В. SIMULINK: среда создания инженерных приложений. М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2003. 496 с.

15.Казакевич В.В., Родов А.Б. Системы автоматической оптимизации. М.: Энергия, 1977. 288 с.

Andruschak S.V., Besedin P.V., Alekseev S.V.

DEVELOPMENT MANAGEMENT SYSTEM IN EXTREME FEED SLUDGE CEMENT KILN

Our procedure extreme mobility management cuttings by mechanical action to effectively reduce power consumption for clinker production by reducing the amount of water used for diluting the slurry to 5 ... 9% when subjected to a vibrating body in the frequency range from 10 to 35 Hz. This reduces the heat consumption for the evaporation of moisture in the furnace unit, as well as the amount of electric power is reduced, consumption of pumps for pumping sludge. It is particularly important that the mobility is greatly increased slurries prepared on the basis of raw materials with a high hygroscopic property. Consideration of mobility management technique can be applied not only to the sludge, but also for other non-Newtonian Bingham fluids such as very dense suspensions and pastes.

***Key words**: extreme control, the cement slurry, rheological properties of the slurry, mathematical model, the mechanical impact.*

Андрущак Сергей Викторович, аспирант кафедры технологии стекла и керамики.
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.
Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.
E-mail: sg-bel@mail.ru

Беседин Павел Васильевич, доктор технических наук, профессор кафедры технологии стекла и керамики.
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.
Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.
E-mail: pvbesedin@yandex.ru

Алексеев Сергей Вячеславович, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии стекла и керамики.
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.
Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.
E-mail: Aleks_SB@List.ru